

Comunidades microbianas endoevaporíticas relacionadas con la precipitación de dolomita en ambiente lacustre salino: Mioceno de la Cuenca de Madrid

J.P. Rodríguez-Aranda, M.E. Sanz-Montero y J.P. Calvo

Dpto. Petrología y Geoquímica, Fac. CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, C/Antonio Novais 2, 28040 Madrid.

ABSTRACT

Microbial endoevaporite communities thrived in a Miocene saline lake where gypsum crystals were precipitate. As a result of both the survival strategies and the metabolic activities carried out by those communities, the gypsum crystals embedding them were intensely corroded and became, in some cases almost totally, replaced by microbially mediated dolomite. Bore holes in gypsum crystals, either filled or not, with cyanobacterial remains, and the isotopic composition of the dolomite are, among others, the evidences provided to support this interpretation. The evaporitic unit also comprises marl, mudstone and dolomite layers. The later mainly represent laminar, domal and pustular stromatolites formed by biomineralization of cyanobacterial mats. Those processes took place in the different subenvironments of a mudflat-saline lake complex spread out the easternmost part of the Madrid Basin during the Lower Miocene (Lower Aragonian).

Key words: endoevaporitic microbes, gypsum replacement, dolomite, saline lake, Miocene.

INTRODUCCIÓN

Los factores cinéticos que inhiben la precipitación directa de dolomita en las condiciones ambientales que imperan en los medios sedimentarios terrestres son, en la actualidad, bien conocidos. Por ejemplo, la presencia de pequeñas proporciones de sulfato y la alta energía de hidratación del Mg^{2+} dificultan la presencia de dicho mineral. Sin embargo, de acuerdo con los experimentos de Vasconcelos y McKenzie (1997), la precipitación de dolomita es viable en medios sulfato-reductores donde existen comunidades microbianas que utilizan el ión sulfato para su metabolismo y se crean microambientes geoquímicos específicos en el entorno de las células microbianas y de las sustancias poliméricas que éstas producen. Basándose en esos resultados, distintos autores han invocado tales procesos para explicar la presencia de dolomía primaria en medios antiguos. En un trabajo reciente, Sanz Montero *et al.* (2003) documentan la presencia de dolomía microbiana y su relación con yesos, dentro del Mioceno de la Cuenca de Madrid.

En el presente trabajo se profundiza en el modelo de formación de la dolomita asociada a yesos y se destaca el importante papel que jugaron las comunidades microbianas endoevaporíticas en su génesis. Dichas comunidades proliferan, introducidas a varios milímetros de la superficie, entre y sobre los cristales de yeso. Aunque existen algunas referencias a este tipo de poblaciones endolíticas habitando en costras yesíferas actuales, sólo en alguna de ellas se

incide en su capacidad para corroer los yesos y biomineralizarse (Douglas, 2004). Por tanto, el presente trabajo no sólo profundiza en tales fenómenos sino que, de forma novedosa, amplía la casuística a secuencias fósiles lo que permite además evaluar el intervalo temporal en que se producen.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La zona de estudio se localiza en las proximidades de Sierra de Altomira que constituye el borde oriental de la Cuenca Terciaria de Madrid (Fig. 1a). Los sedimentos estudiados afloran dentro de la formación evaporítica denominada "yesos en árbol de Navidad" (Rodríguez Aranda *et al.*, 1995). Esta formación se sitúa en los tramos más altos de la Unidad Inferior del Mioceno (Aragoniense inferior) de la Cuenca de Madrid. La serie evaporítica, de unos 50 m de espesor medio, está constituida por una sucesión de yesos, dolomías, margas y lutitas, que incluyen nódulos de anhidrita actualmente hidratados a yeso secundario.

Esta serie se depositó en un complejo continental de llanura lutítica-lago salino, adyacente a los sistemas de abanicos aluviales procedentes del borde de cuenca (Fig. 1b). El sistema lacustre (20 km de largo y 10 km de ancho) era independiente de un lago principal hipersalino dispuesto en las zonas más centrales de la cuenca. De acuerdo con Rodríguez Aranda *et al.* (1995), la composición química de partida en la salmuera del complejo lacustre se caracterizaba por: $HCO_3 \ll Ca + Mg, Ca \gg Mg + Ca > SO_4$.

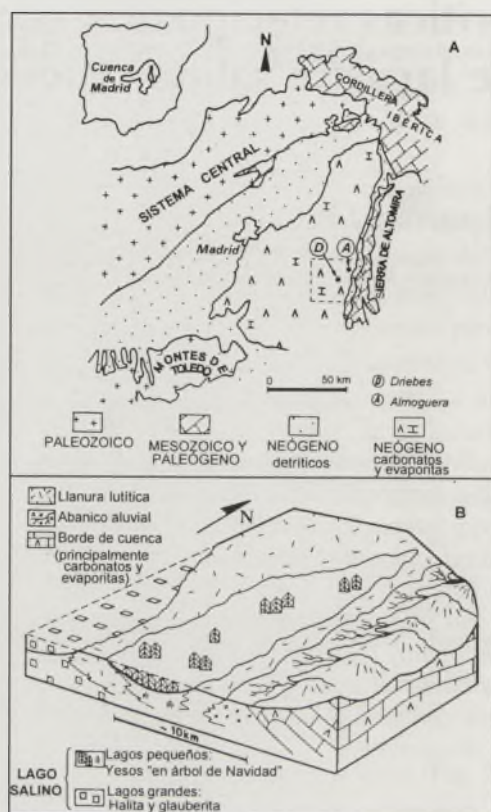


FIGURA 1. A) Esquema geológico de la Cuenca de Madrid y situación de la zona de estudio. B) Modelo sedimentario de la zona de estudio durante el Aragoniense inferior.

ASOCIACIÓN DE FACIES Y MODELO SEDIMENTARIO

La asociación de facies que caracteriza a la serie estudiada se dispone según una secuencia positiva de expansión lacustre que se puede dividir en tres tramos (Fig. 2). Cada tramo se corresponde con ambientes sedimentarios concretos dentro del sistema general de llanura lutítica-lago salino.

Tramo 1: 0,3 a 10 m de lutitas pardas y verdes bioturbadas por raíces con nódulos desplazativos de anhidrita, que se sedimentaron en ambientes de llanura lutítica seca y salina, alimentadas por mantos de arroyada procedentes de los abanicos aluviales que orlaban la Sierra de Altomira (Rodríguez-Aranda, 1995).

Tramo 2: 0,1 a 2,5 m de una alternancia de lutitas y margas magnesíticas blanco-verdosas con niveles decimétricos de dolomías, de gran continuidad lateral. Los carbonatos se clasifican como *wackestone* de carofitas o bien, como *bindstone* (estromatolítico planar). Cualquiera de estas facies puede presentar nódulos de anhidrita así como de pseudomorfos y moldes de yeso y glauberita.

Este segundo término se depositó en sendos ambientes de llanura lutítica salina (facies lutíticas y margosas) y margen lacustre (dolomías). En dichos ambientes alternaban

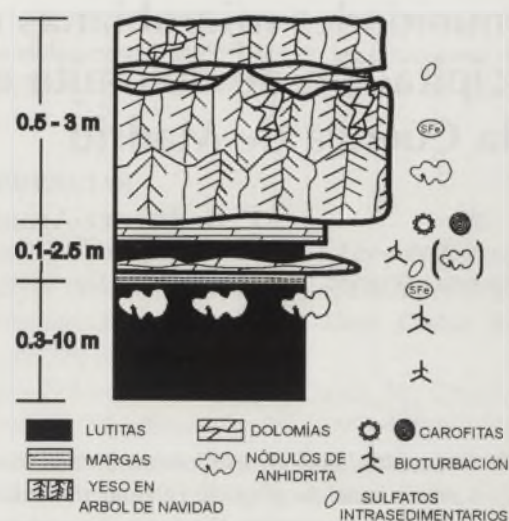


FIGURA 2. Secuencia característica de la unidad "yesos en árbol de Navidad".

episodios de salinidad moderada con otros más áridos, durante los cuales se producía la exposición subaérea del sedimento, a la vez que la concentración de las salmueras freáticas que empapaban el sedimento.

Tramo 3: 0,5 a 3 m de un banco tabular de yesos macrocristalinos grises maclados verticalmente según (100) con morfología en árbol de Navidad. La dimensión vertical de los cristales de yeso es de 8 a 30 cm, pero, normalmente, también están elongados en la horizontal varios decímetros, siendo su anchura típica de 2 a 11 cm. Los macrocristales están constituidos, a su vez, por numerosos subcristales milimétricos y centimétricos, delimitados por materia orgánica y cristales de dolomita, que se apilan epitaxialmente en la vertical con una gran regularidad.

En el banco de yeso se distinguen secuencias, que se corresponden con la altura de los macrocristales, definidas por superficies de disolución o niveles discontinuos dolomíticos cuyo espesor varía lateralmente desde algunos centímetros a pocos decímetros. Los niveles dolomíticos constituyen estromatolitos de morfologías dómicas o pustulares y su estructura interna es, en general, masiva hacia la base y finamente laminada hacia techo. El carbonato se caracteriza como una dolomicrítica con rasgos típicos de origen microbiano (Sanz Montero *et al.*, 2003). La base de los niveles dolomíticos suele ser irregular, pues la dolomía se introduce en el yeso reemplazándolo. Este efecto de reemplazamiento también se observa hacia techo, aunque con mucha menor intensidad. El reemplazamiento del yeso por la dolomita tiene lugar preferentemente a favor de los límites entre cristales y subcristales y, en muchos casos, mimetiza perfectamente la fábrica en árbol de Navidad.

Todas estas facies muestran desarrollo, en mayor o menor medida, de nódulos de anhidrita reemplazativos que pueden desplazar, además, a las dolomías en su crecimiento.

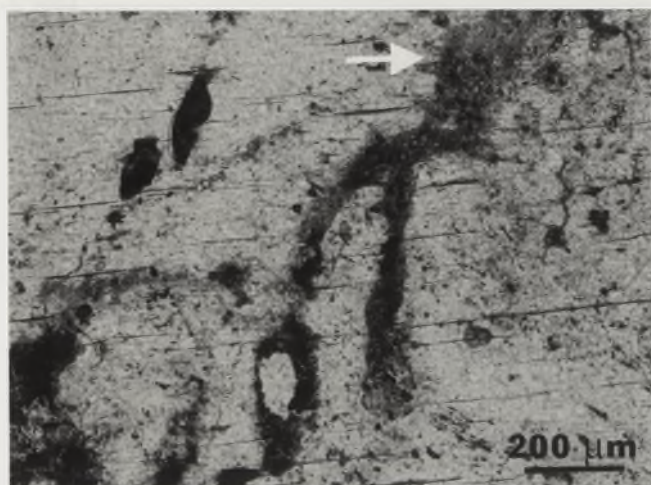


FIGURA 3. Microfotografía donde se muestra el límite entre subcristales sucesivos de yeso. Se aprecian corrosiones y perforaciones tanto en el límite como en el interior de los cristales. La flecha señala restos de materia orgánica parcialmente mineralizada a dolomita.

El tramo 3 se corresponde con el ambiente lacustre salino de la secuencia. Los cristales de yeso precipitarían durante periodos áridos. En estos periodos alternaban, a su vez, momentos de sobresaturación en sulfato cálcico, con crecimiento cristalino, y fases de dilución, en las que dicho crecimiento paraba y se desarrollaban comunidades microbianas sobre los cristales. Dicha sucesión probablemente tenía carácter estacional dada la gran regularidad que muestra el apilamiento epitaxial de los subcristales de yeso en la vertical. Por otro lado, se producían periodos menos áridos en los que se formaban los niveles de dolomía asociados con la actividad de cianobacterias y bacterias sulfatorreductoras (Sanz-Montero *et al.*, 2003). La secuencia culminaría con un episodio de desecación lacustre durante el que precipitarían los nódulos de anhidrita que reemplazan a las facies yesíferas y dolomíticas.

COMUNIDADES MICROBIANAS ENDOEVAPO- RÍTICAS. EVIDENCIAS PETROLÓGICAS

Los macrocristales de yeso se componen de subcristales que contienen dentro y en su entorno dolomita, materia orgánica y/o rasgos de microdisolución (Figs. 3, 4 y 5). La materia orgánica puede alcanzar hasta un 10% y, según las observaciones realizadas, referentes fundamentalmente a su morfología y a su composición determinada con el EDS del microscopio electrónico de barrido, se corresponden con restos de comunidades microbianas, básicamente cianobacterias (p.e., Noffke *et al.*, 2003). Así, se han reconocido cianobacterias cocoides (tamaños medios 3 µm) que suelen agruparse en forma de hileras, tétradas, pares, etc. (Fig. 4). También se han reconocido restos orgánicos con morfologías cilíndricas, de diámetros próximos a las 12 µm y longitudes que pueden superar las 100 µm, que son rasgos propios de las vainas que típicamente envuelven los trico-

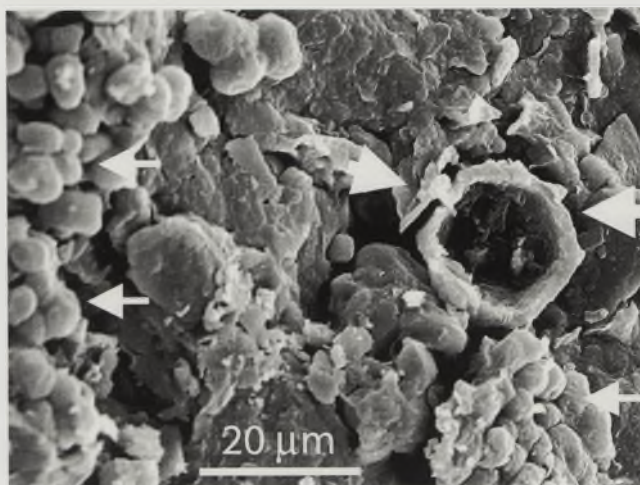


FIGURA 4. Fotografía de M.E.B. de cianobacterias cocoides no mineralizadas (flechas pequeñas). Las de la izquierda forman agrupaciones típicas en tétradas. En el centro, se muestra un cristal hueco de dolomita (flechas grandes).

mas de las especies cianobacterianas filamentosas (Fig. 5). Asimismo, se aprecian restos con microestructura fibrosa que representarían las sustancias poliméricas extracelulares (EPS), que suelen segregar las comunidades cianobacterianas. Todos los tipos de materia orgánica indicados aparecen parcialmente mineralizados en cristales de dolomita de tamaño micrítico y microesparítico (tamaño medio 15 µm). Estos últimos aparecen con huecos y adoptan morfologías de subesféricas a romboédricas (Fig. 4). Tales cristales son resultado de una biomineralización producida en vida de las células, pues la estructura no se encuentra colapsada; posteriormente, al pudrirse las células, dejan vacío el espacio que ocupaban. En otras ocasiones, la materia orgánica aparece como masas negras carbonizadas (Fig. 4).

Las disoluciones presentes en los yesos pueden tener distintos tamaños y morfologías (Fig. 3) entre las que destacan las alabeadas de morfología cilíndrica. Éstas se disponen con distintas orientaciones, presentan secciones longitudinales de orden submilimétrico y secciones transversales que abarcan varias decenas de micras. Este tipo de disolución representa auténticas perforaciones que cortan la estructura cristalina del yeso (líneas de exfoliación, básicamente), que pueden llegar a converger aislando fragmentos de yeso (Fig. 3). Dado que el tamaño de los subcristales es de orden milimétrico, es frecuente que las perforaciones alcancen, desde distintas posiciones, las partes más céntricas del cristal. Las perforaciones pueden estar huecas o contener materia orgánica.

La observación de las perforaciones a ambos lados de las superficies que limitan los cristales y subcristales de yeso indicaría que las comunidades microbianas estaban activas cuando fueron incluidas en los cristales tras un nuevo episodio de crecimiento de yeso. De modo que pugarían por abrirse paso hacia la luz perforando el subcristal inmediatamente superior.

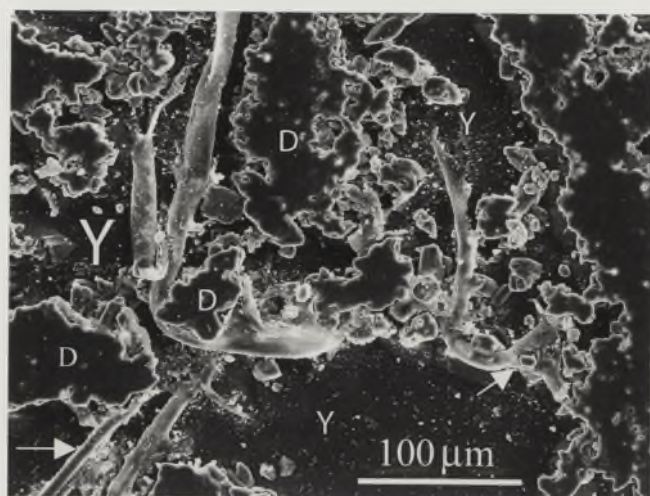


FIGURA 5. Fotografía de M.E.B. sobre sección pulida. Restos de materia orgánica, posiblemente vainas de cianobacterias, parcialmente mineralizados en dolomita dentro de un cristal de yeso.

Por todo ello, se interpreta que estas perforaciones han sido causadas por comunidades microbianas endolíticas (endoevaporíticas), que no viven sobre la superficie sino entre los cristales a cierta profundidad de la superficie. Este tipo de comunidades se han descrito en medios evaporíticos actuales, por ejemplo, en el Valle de la muerte (Douglas, 2004), donde se reconoce su capacidad corrosiva ante el yeso debido tanto a la actividad de las bacterias sulfatorreductoras, presentes en estas comunidades, como a los elevados valores de pH que se alcanzan (superiores a 8). Los rasgos isotópicos de la dolomita incluida dentro de los cristales de yeso en árbol de Navidad se caracterizan por valores negativos de ^{13}C , que apoyan su génesis relacionada con comunidades microbianas. Por otro lado, los valores de ^{18}O son también negativos, fenómeno anormal en un medio evaporítico que debería estar enriquecido en isótopos pesados, como, de hecho, los están los minerales sulfatados asociados (Calvo *et al.*, 1989). Este último dato se puede explicar si tenemos en cuenta que las comunidades microbianas generan microambientes en los que existe agua enriquecida en isótopos ligeros derivada de procesos metabólicos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ilustra la presencia de comunidades microbianas endoevaporíticas (endolíticas) en una serie yesífera del Mioceno y se aportan criterios para su reconocimiento en otras series. La actividad de los microbios produce corrosión en el yeso, a la vez que favorece la biomineralización por dolomita. La combinación de ambos procesos culmina en el reemplazamiento de yeso por dolomita.

Por otra parte, se propone que las cianobacterias corroen el yeso, biomineralizan por su propia actividad metabólica y aportan una gran cantidad de materia orgánica. Por otra parte, las bacterias sulfatorreductoras pudren la materia orgánica aportada por las cianobacterias y favorecen el reemplazamiento paulatino del yeso por dolomita con su metabolismo.

Asimismo se documenta cómo la biomineralización de las comunidades microbianas se puede producir en relación con distintos tipos de componentes orgánicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado dentro de las actividades del Proyecto BTE 2001-1443 del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

REFERENCIAS

- Calvo, J.P., Ordóñez, S., García del Cura, M.A., Hoyos, M., Alonso-Zarza, A.M., Sanz Montero, M.E. y Rodríguez Aranda, J.P. (1989): Sedimentología de los complejos lacustres miocenos de la Cuenca de Madrid. *Acta Geológica Hispánica*, 24: 281-298.
- Douglas, S. (2004): Microbial biosignatures in evaporite deposits: evidence from Death Valley, California. *Planetary and Space Science*, 52: 223-227.
- Noffke, N., Gerdes, G. y Klenke, T. (2003): Benthic cyanobacteria and their influence on the sedimentary dynamics of peritidal depositional systems (siliciclastic, evaporitic salty, and evaporitic carbonatic). *Earth-Science Review*, 1279: 1-14.
- Rodríguez-Aranda, J.P. (1995): *Sedimentología de los sistemas de llanura lutítica-lago salino del Mioceno de la zona oriental de la Cuenca de Madrid (Tarancón-Auñón)*. Tesis doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 474 p.
- Rodríguez-Aranda, J.P., Rouchy, J.M., Calvo, J.P., Ordóñez, S. y García del Cura, M.A. (1995): Unusual twining features in large primary gypsum crystals formed in salt lake conditions, Middle Miocene, Madrid Basin, Spain -palaeoenvironmental implications. *Sedimentary Geology*, 95: 123-132.
- Sanz Montero, M.E., Rodríguez-Aranda, J.P. y Calvo, J.P. (2003): Dolomías primarias en ambiente lacustre salino: Mioceno de la Cuenca de Madrid. *Geotemas*, 5: 209-212.
- Vasconcelos C., y McKenzie J.A. (1997): Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil). *Journal of Sedimentary Research*, 67: 378-390.